

喀斯特高原山地土壤抗冲性与土壤物理性质的关系

资如毅¹, 赵龙山^{1,2}, 钱晓鹤¹, 陈娟¹

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025)

摘要: 为探究喀斯特高原山地不同土地利用类型土壤抗冲性及其与土壤物理性质的关系, 以马尾松人工林地(PMP)、桂花人工林地(OFP)、天然乔灌混交林地(ASL)、天然草地(NGL)、撂荒地(AL)、农地(CL)为研究对象, 采用原状土水槽冲刷试验法, 根据研究区地形及气候特点, 设置 3 个坡度(5°, 15°, 25°), 3 个冲刷流量(3.2, 4.8, 6.4 L/min), 冲刷时间均为 15 min, 结合土壤物理性质(容重、孔隙度、水稳性团聚体、机械组成等), 定量分析不同土地利用类型下土壤抗冲性及其与土壤物理性质的关系。结果表明: (1) 在原状土冲刷试验过程中, 各地类初始径流含沙量较高, 但随着冲刷时间的延长, 径流含沙量呈先降低后趋于稳定趋势, 且随着坡度和冲刷流量的增大, 径流含沙量趋于稳定的时间有所提前; (2) 土壤抗冲系数随坡度和冲刷流量的增大而减小, 且坡度对土壤抗冲性的影响比冲刷流量更明显。在同等条件下, 各地类土壤抗冲系数依次为 NGL>PMP>ASL>AL>OFP>CL, 土壤抗冲系数分别为 13.44~87.84, 8.14~93.15, 2.93~45.36, 1.21~10.01, 1.25~5.48, 0.17~1.27 (L·min)/g; (3) 土壤抗冲性与土壤容重、砂粒含量、水稳性团聚体含量呈极显著正相关($P<0.01$), 与总孔隙度、黏粒含量呈显著负相关($P<0.05$), 其关系均可用幂函数表示($R^2>0.78$)。研究结果可为喀斯特区土壤侵蚀研究和水土保持防治提供科学依据。

关键词: 土壤抗冲性; 土地利用类型; 冲刷试验; 土壤侵蚀; 喀斯特

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0023-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.004

Relationship Between Soil Anti-scourability and Soil Physical Properties in Karst Mountain Areas

ZI Ruyi¹, ZHAO Longshan^{1,2}, QIAN Xiaohe¹, CHEN Juan¹

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. Research Centre for Soil Erosion & Eco-Restoration Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: In order to study the soil anti-scourability and its relationship with soil physical properties in different land use types in karst area, taking *Pinus Massoniana* plantation land (PMP), *Osmanthus fragrans* plantation land (OFP), mixed forest land of natural arbor and shrub (ASL), natural grassland (NGL), abandoned land (AL) and cropland (CL) as research objects, the erosion test method of undisturbed soil flume was adopted, combining soil physical properties (bulk density, porosity, water-stable aggregates, mechanical composition, etc.), soil anti-scourability and its relationship with soil physical properties under different land use were quantitative analyzed. In the experiment, 3 slopes of 5°, 15°, 25° and 3 scour flows of 3.2, 4.8, 6.4 L/min were set up. The results showed that: (1) During the whole process of erosion test, the sediment concentration of runoff was the highest in the first 2 minutes of erosion, and then decreased gradually, and tended to be stable after 3~11 minutes. (2) The soil anti-scourability coefficient of each land use was NGL > PMP > ASL > AL > OFP > CL. The soil anti-scourability coefficient decreased with the increase of slope and erosion discharge, and the effect of slope on soil anti-scourability was more obvious than that of erosion discharge; (3) Soil anti-scourability was significantly positively correlated with soil bulk density, sand content and water-stable aggregate content ($P < 0.01$), and negatively correlated with total porosity and clay content ($P < 0.05$), which could be expressed by power function ($R^2 > 0.78$). The results can provide

收稿日期: 2021-11-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41867014); 贵州省优秀青年科技人才项目(黔科合平台人才[2019]5671); 贵州省高等学校科技拔尖人才项目(黔科合 KY 字[2021]025); 中国博士后科学基金项目(2020M670527)

第一作者: 资如毅(1994—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ruyizi0909@163.com

通信作者: 赵龙山(1985—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: longshanzh@163.com

scientific basis for soil erosion research and soil and water conservation control in karst area.

Keywords: soil anti-scourability; land use type; scouring test; soil erosion; Karst

土壤抗冲性是指土壤抵抗降雨径流对其机械破坏和推动下移的性能^[1],是衡量土壤抗侵蚀能力的重要指标。在我国,关于土壤抗冲性的研究较多,特别对土壤抗冲性的测量方法、评价指标及影响因素等方面^[2]。

已有研究^[3-5]表明,影响土壤抗冲性的因素主要包括坡度、植物根系、土地利用方式及土壤性质等。蒋定生等^[6]研究表明,黄土高原地区不同土地利用类型的土壤抗冲系数为 0.01~102.40 (L·min)/g;周正朝等^[7]对林地土壤抗冲性研究表明,随着次生林植被的正向演替,在根系作用下表层土壤的抗冲系数从 0.8 (L·min)/g 上升至 3.4 (L·min)/g;王丹丹等^[8]对晋西黄土区退耕还林地土壤抗冲性的研究表明,刺槐与侧柏混交退耕林地的土壤抗冲性大于农地和荒草地。另外,坡度和径流量对土壤抗冲性也具有重要的影响。张建军等^[4]和任艳等^[5]研究了不同植被覆盖和不同土壤类型条件下土壤抗冲性表明,土壤抗冲性均随坡度的增加呈减弱的趋势。张建军等^[4]分析了不同植被条件下径流量对土壤抗冲性的影响表明,土壤抗冲性与径流量呈负相关关系。可见,在自然条件下,因土地利用的差异土壤抗冲性存在一定的时空变化,植物根系对提高土壤抗冲性具有重要作用^[9]。

以贵州为中心的西南喀斯特区生态环境脆弱,过去由于人们对该区域土壤侵蚀问题认识不足,在生产活动中造成地表植被破坏,进而导致大量的土地石漠化。近年来,随着退耕还林、荒山造林等措施的实施,地表覆盖度得到明显提高,土地石漠化得到有效遏制^[10]。因此,研究喀斯特地区土壤抗冲性,对揭示该地区土壤侵蚀过程与石漠化逆转机制具有重要的科学意义。已有研究^[11-12]讨论了喀斯区土壤抗冲性与基岩性质、植被覆盖和坡耕地水动力性质的关系,但针对喀斯特区不同土地利用条件下土壤抗冲性及其影响因素的研究还不够深入。

鉴于此,本文采用原状土水槽冲刷试验方法,以马尾松人工林地(PMP)、桂花人工林地(OFP)、天然乔灌混交林地(ASL)、天然草地(NGL)、撂荒地(AL)、农地(CL)6种地类土壤为研究对象,定量研究不同土地利用下土壤抗冲性特征及其与土壤物理性质的关系,以期对喀斯特区土壤侵蚀定量评价及生态环境建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及土壤样品采集

试验土样采自贵州省贵阳市花溪区坡地(26°22'N, 106°37'E)。采样时间为 2021 年 5—8 月。花溪区地处黔中腹地,位于长江流域和珠江流域分水岭,属于亚热带季风湿润气候区,地貌以山地和丘陵为主,为

典型的喀斯特高原山地区,海拔 1 100~1 300 m,年均气温 15.3℃,年均降水量 1 129.5 mm,年均蒸发量 920 mm。在石灰岩和白云岩等典型成土母质及山地地形和高原季风湿润气候综合作用下,发育形成的土壤以黄壤和石灰土为主。

研究区主要有林地、天然草地、农地和撂荒地几种土地利用类型,其中,林地包括天然林地和人工林地,天然林以乔灌混交最为常见。由于研究区土壤偏酸性,人工林地树种以马尾松为主,也有以桂花为主的景观绿化树种的种植。因此,本研究将土地利用分为马尾松(*Pinus massoniana*)人工林地、桂花(*Osmanthus fragrans*)人工林地、天然乔灌混交林地(主要植物:盐肤木(*Rhus chinensis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*))、天然草地(主要植物:白茅(*Imperata cylindrica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、蕨(*Pteridium aquilinum*))、撂荒地(撂荒 1 年以上,主要植物:藜(*Chenopodium album*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、苋(*Amaranthus tricolor*)、鬼针草(*Bidens pilosa*))、农地(主要作物:玉米(*Zea mays*))等 6 种类型。

每种地类设置 1 m×1 m 的样方 10 个,在每个样方内按 5 点法取土样,以测定土壤物理性质和土壤抗冲性。其中,土壤抗冲性样品采用 200 cm³ 的标准环刀采集,取样时先清理样方内土壤表面的枯落物及碎石等植物残茬,然后将环刀垂直打入土壤表层,待环刀上沿与土壤表面齐平后挖出环刀,并用铝盖将环刀口盖上,特别在底盖内垫 1 张滤纸,以保证在后期样品预处理时均匀润湿土壤和防止土壤从底部漏出。同时,采用 100 cm³ 的标准环刀采集土壤样品带回实验室中测量土壤容重及孔隙度;用铝盒收集取样点表层土壤用于测定土壤机械组成和水稳性团聚体。为了保证试验精度,土样采集中同一样方内土壤抗冲性、物理性质测定样品的空间位置尽可能相邻。每个样方内的样品采集 5 个重复。

1.2 土壤抗冲性测定

本研究使用的原状土冲刷水槽见图 1,由中科院水土保持研究所设备加工厂生产。水槽材质为有机玻璃,主要包括支架、水槽、装样室、水流稳定槽、径流收集口等配件。水槽长、宽分别为 100,8 cm;装样室内径(76 mm)略大于环刀外径(75 mm),以保证试验中环刀能放入和取出装样室且间隙较小。水槽坡度可通过坡度调节支柱按照试验设计调整。

试验于 2021 年 5—8 月在贵州大学西校区水土保持工程实验室进行。为保证土样初始含水率一致,冲刷试验前先对土样进行预湿润处理:即将环刀连同带小孔的底盖一起放入平底容器内,然后向容器内加水至

水面与环刀上沿齐平,土样浸泡 6 h 后,取出环刀放在带有网孔的支架静置 24 h,以排出水分。待样品预处理结束后,将环刀放入水槽装样室进行冲刷试验。根据研究区地貌特征,本试验设置 5°,15°,25°的 3 个坡度;另外,根据研究区降雨特征,分别设置 2 400,3 600,4 800 L/(h·m)的 3 个供水单宽流量,换算为本试验水槽实际流量分别为 3.2,4.8,6.4 L/min。

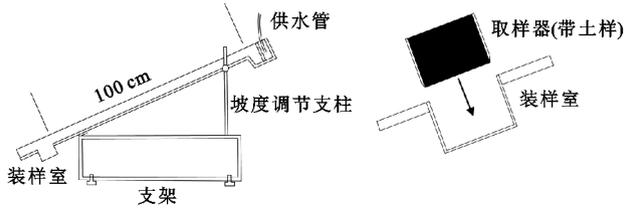


图 1 原状土冲刷水槽示意

冲刷试验开始后,水槽径流收集口以 1 min 间隔收集全部径流泥沙样品。试验结束后,先对每个径流样品称重,并记录样品重量。因样品中含有泥沙,故将称重后的样品在室内静置 30 min 左右,再用定性滤纸($\Phi=30 \mu\text{m}$)过滤样品,析出泥沙。泥沙析出后,将其放入烘箱中烘干称重(85 °C, 3 h)。以上数据用于计算径流含沙量和土壤抗冲系数。

1.3 土壤物理性质测量

本研究中土壤物理性质包括土壤容重、总孔隙度、机械组成和水稳性团聚体。其中,土壤容重和总孔隙度采用 100 cm³ 的标准环刀样品测量,测量方法为常规的浸泡—烘干称重法^[6];土壤机械组成采用激光粒度分布仪测定(Bettersize 2600),按粒径分为砂粒(2~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm);水稳性团聚体采用湿筛法测定,粒径范围分为>5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm。

1.4 数据分析

本研究以径流含沙量和土壤抗冲系数作为土壤抗冲性指标,土壤抗冲系数用蒋定生等^[6]提出的方法计算,即冲刷掉单位质量土壤所需的水量和时间的乘积,计算公式为:

$$Kc = Qt/W$$

式中: Kc 为抗冲系数(L·min)/g; Q 为冲刷水量(L); t 为冲刷时间(min); W 为冲刷掉的土壤干重(g)。

通过 Excel 2019 软件对径流含沙量、土壤抗冲系数和土壤物理指标进行计算处理并绘制图表,采用 Origin 2017 软件进行径流含沙量动态特征图绘制,采用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析及土壤抗冲性与土壤物理性质相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同坡度及流量条件下各地类径流含沙量动态特征

原状土冲刷试验过程中,不同地类土壤径流含

沙量随冲刷时间的动态变化过程见图 2。各地类含沙量在冲刷开始后 5 min 内呈下降趋势,5~15 min 含沙量较小,且各地类相互之间相差不大。此外,不同坡度和冲刷流量条件下其径流含沙量随时间的动态变化特征有所差异。坡度为 5°,冲刷流量为 3.2 L/min 条件下,各地类径流含沙量均处于较低水平。随着冲刷流量的增大,各地类径流含沙量随之增大,且各地类径流含沙量除农地在 6 min 后才趋于稳定外,其他几种地类均在 2~4 min 后趋于稳定。在坡度为 15°,25°时,随着冲刷流量的增大,各地类径流含沙量趋于平缓的时间逐渐提前。

2.2 不同地类土壤抗冲系数对比分析

由表 1 可知,不同坡度和流量条件下,土壤抗冲系数均表现为 NGL(13.44~87.84 (L·min)/g) > PMP(8.14~93.15 (L·min)/g) > ASL(2.93~45.36 (L·min)/g) > AL(1.21~10.01 (L·min)/g) > OFP(1.25~5.48 (L·min)/g) > CL(0.17~1.27 (L·min)/g),且 NGL、PMP 和 ASL 土壤抗冲系数显著高于 AL、OFP、CL 3 个地类。

在不同坡度条件下,6 种地类的土壤抗冲系数在 3.2 L/min 的冲刷流量下表现为 5°与 15°,25°差异极显著($P < 0.01$),15°与 25°之间差异不显著($P > 0.05$);在冲刷流量为 4.8 L/min 时,OFP 的土壤抗冲系数在 3 个坡度之间无显著差异($P > 0.05$),NGL 地在 25°与 5°,15°之间差异显著($P < 0.05$),4 种地类则均表现为 5°与 15°,25°差异显著($P < 0.05$);冲刷流量为 6.4 L/min 时,CL 的土壤抗冲系数在 3 个坡度间均存在显著差异($P < 0.05$),OFP、PMP 在 3 个坡度间差异均不显著($P > 0.05$),AL 土壤抗冲系数仅在 5°与 25°间存在显著差异;ASL 地在 5°与 15°,25°之间差异显著($P < 0.05$)。说明坡度对不同地类土壤抗冲性的影响还受冲刷径流量大小的限制。

同坡度不同冲刷流量条件下,AL 和 NGL 土壤抗冲系数在 3 种冲刷流量间均无显著性差异($P > 0.05$),说明 AL 和 NGL 的土壤抗冲性受冲刷流量影响不大;ASL 抗冲系数在坡度为 15°,25°时,表现为 3.2 L/min 与 4.8,6.4 L/min 间差异显著($P < 0.05$),4.8 L/min 与 6.4 L/min 间无显著差异($P > 0.05$);CL、OFP、PMP 土壤抗冲系数在 5°时,冲刷流量条件下 3.2 L/min 与 4.8,6.4 L/min 间差异极显著($P < 0.01$);坡度为 25°时,OFP 土壤抗冲系数在 3 种流量条件下差异均不显著($P > 0.05$),CL、PMP 土壤抗冲系数表现为 3.2 L/min 与 4.8,6.4 L/min 间差异显著($P < 0.05$)。

可见,坡度对不同地类土壤抗冲性的影响受冲刷流量大小限制,同样,流量对土壤抗冲性的影响亦受坡度限制;但总体而言,坡度对土壤抗冲性的影响更大。

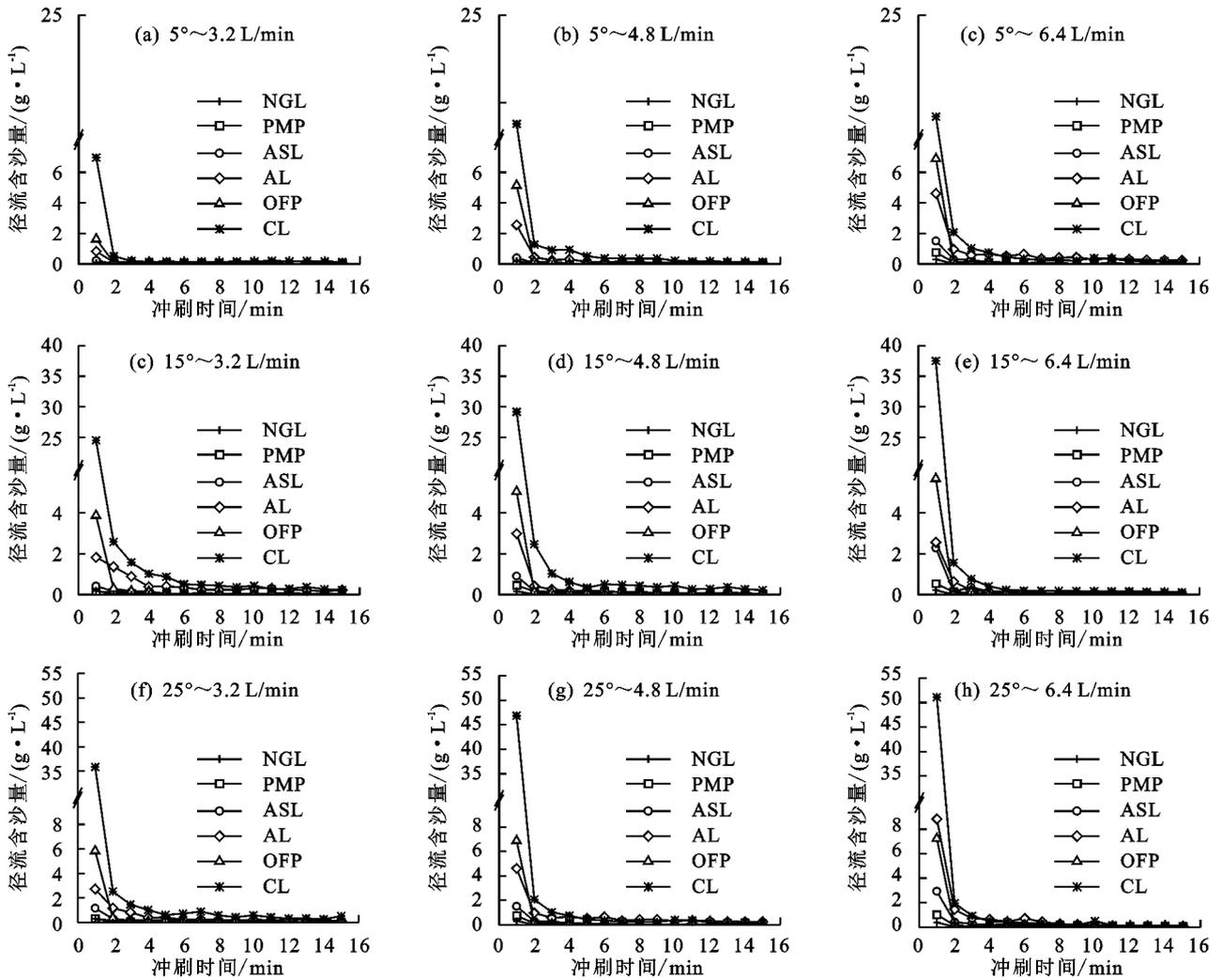


图 2 径流含沙量随冲刷时间的变化特征

表 1 不同坡度和冲刷流量条件下土壤抗冲系数

坡度/(°)	地类	土壤抗冲系数/(L·min·g ⁻¹)		
		3.2 L/min	4.8 L/min	6.4 L/min
5	CL	1.27±0.38Aa	0.45±0.2Ba	0.44±0.04Ba
15		0.32±0.03Ab	0.28±0.04ABb	0.23±0.04Bb
25		0.22±0.03Ab	0.18±0.04Bb	0.17±0.01Bc
5	AL	10.01±4.73Aa	6.61±3.72Aa	4.50±3.13Aa
15		2.55±0.91Ab	3.90±2.52Ab	3.07±1.35Ab
25		2.26±1.06Ab	1.72±0.63Ab	1.21±0.83Ab
5	OFP	5.48±1.49Aa	2.03±0.43Ba	1.86±0.60Ba
15		2.18±0.60Ab	1.73±0.24Aa	1.61±0.35Aa
25		1.96±0.98Ab	1.55±0.73Aa	1.25±0.26Aa
5	ASL	45.36±30.27Aa	24.15±7.65Aa	20.16±8.02Aa
15		13.33±4.10Ab	8.12±2.76Bb	4.46±3.55Bb
25		6.80±2.44Ab	4.47±1.05Bb	2.93±1.08Bb
5	PMP	93.15±35.45Aa	34.75±15.66Ba	32.85±21.77Ba
15		34.00±18.17Ab	13.69±5.48Bb	12.48±2.79Bb
25		18.83±1.90Ab	9.46±3.22Bb	8.14±2.45Bb
5	NGL	87.84±39.05Aa	53.95±36.30Aa	46.59±16.08Aa
15		44.88±25.64Ab	52.84±23.49Aa	44.62±15.14Aa
25		33.39±16.12Ab	26.93±7.29Aa	13.44±6.77Ab

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同大写字母表示同一坡度不同冲刷流量间土壤抗冲系数差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示同一冲刷流量不同坡度间土壤抗冲系数差异显著($P<0.05$)。

2.3 不同地类土壤物理性质分析

由表 2 可知,土壤容重大小表现为 $\text{NGL}>\text{PMP}>\text{ASL}>\text{AL}>\text{OFP}>\text{CL}$ 。由于农地缺少根系的固结,且受人为扰动较大,因此,农地的土壤容重最小。土壤孔隙度大小代表土壤的疏松程度,各地类的土壤总孔隙度则表现为 $\text{CL}>\text{OFP}>\text{AL}>\text{ASL}>\text{PMP}>\text{NGL}$ 。土壤颗粒大小不同,其抵抗径流搬运的能力也不同,本研究中各地类土壤机械组成以粉粒为主,均占 30% 以上,且不同地类粉粒占比表现为 $\text{PMP}>\text{AL}>\text{NGL}>\text{ASL}>\text{OFP}>\text{CL}$;其次是土壤黏粒,占比 15%~26%,各地类黏粒含量表现为 $\text{CL}>\text{OFP}>\text{AL}>\text{ASL}>\text{PMP}>\text{NGL}$,砂粒含量则与黏粒相反,仅占 1%~10%。水稳性团聚体也是评价土壤抵抗水流侵蚀的重要指标。由表 3 可知,不同土地利用类型 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体平均含量表现为 $\text{NGL}(64.67\%)>\text{PMP}(56.63\%)>\text{ASL}(49.86\%)>\text{AL}(47.09\%)>\text{OFP}(43.66\%)>\text{CL}(38.30\%)$ 。总体而言,相较于农地,受人为干扰较小的其他地类土壤结构具有一定程度的改善,从而增强了土壤抗冲刷的能力。

2.4 土壤物理性质对土壤抗冲性的影响

对土壤抗冲系数与土壤容重和总孔隙度做一元回归分析(图 3)发现,土壤抗冲系数与土壤容重、总孔隙度呈指数函数关系,与土壤容重呈正相关关系($R^2 = 0.893$),与总孔隙度呈负相关关系($R^2 = 0.901$)。表明土壤容重越大、总孔隙度越小,土壤越紧实,土壤颗粒不易被径流搬运、冲蚀,其抗冲性能也就越强。

土壤机械组成反映了土壤颗粒组成及质地,土壤颗粒组成不同,其抵抗径流搬运的能力也不同。分析土壤机械组成与土壤抗冲性的关系(图 4)显示,

表 2 土壤容重、总孔隙度和机械组成

土地利用类型	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	机械组成/%		
			砂粒 0.05~2 mm	粉粒 0.002~0.05 mm	黏粒 <0.002 mm
NGL	1.26±0.04	26.79±3.49	9.84	32.56	15.22
PMP	1.21±0.02	35.48±4.52	7.14	34.38	16.96
ASL	1.20±0.02	46.91±9.65	5.80	35.44	17.53
AL	1.14±0.06	51.82±5.02	4.41	37.23	18.12
OFP	1.07±0.12	53.05±3.45	2.28	37.43	20.57
CL	0.94±0.10	55.02±3.89	1.35	35.93	25.44

表 3 土壤水稳性团聚体含量

土地利用类型	各粒径水稳性团聚体含量均值/%					
	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	>0.25 mm
NGL	50.23	6.92	3.72	2.36	1.44	64.67
PMP	43.56	5.62	4.02	2.25	1.17	56.63
ASL	21.41	11.24	9.54	4.86	2.81	49.86
AL	10.62	11.98	12.31	10.74	6.44	47.09
OFP	9.40	15.40	11.62	5.84	1.41	43.66
CL	0.80	1.78	3.51	17.72	14.50	38.30

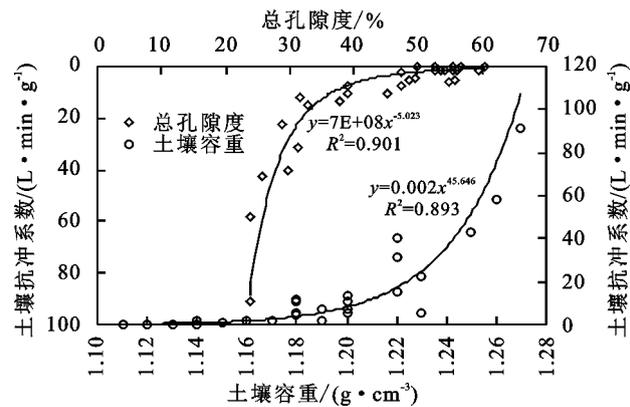


图 3 土壤抗冲系数与土壤容重、总孔隙度的关系

对土壤抗冲系数与土壤各物理性质之间的关系进行了相关分析,由 Pearson 相关分析得出,土壤抗冲系数与土壤容重、砂粒含量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.772, 0.778, 0.876;与总孔隙度呈极显著负相关,相关系数为-0.757,与黏粒含量呈显著负相关,相关系数为-0.534;与粉粒含量相关性未达显著水平,相关系数

土壤抗冲系数与土壤粗砂粒含量及黏粒含量呈幂函数关系,土壤抗冲系数与粗砂粒含量呈正相关关系($R^2 = 0.887$),与黏粒含量呈负相关关系($R^2 = 0.776$)。说明土壤颗粒越大,越难被径流冲蚀,抗冲性能也就越强。

分析了各粒级水稳性团聚体含量对抗冲系数的影响(图 5),利用指数函数模型对土壤抗冲系数与各粒径水稳性团聚体含量进行拟合,结果表明,>0.25 mm 水稳性团聚体与土壤抗冲系数之间呈指数型正相关关系,相关指数 R^2 为 0.907。

为 0.410。可见,土壤物理性质对土壤抗冲性的影响表现为>0.25 mm 水稳性团聚体最为显著,其次是土壤容重和砂粒含量,再次是黏粒含量,而粉粒含量对土壤抗冲性无显著影响。

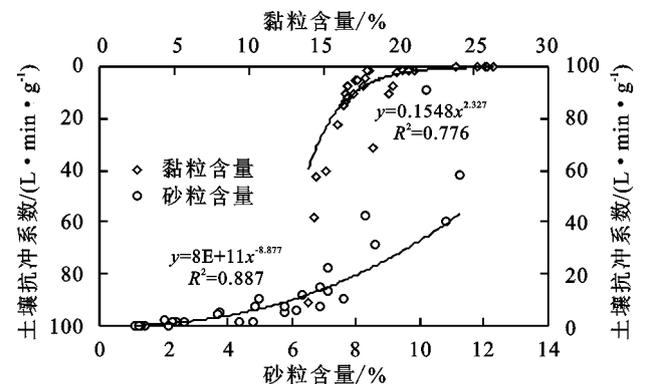


图 4 土壤抗冲系数与砂粒含量、黏粒含量的关系

3 讨论

本研究表明,随着冲刷时间的延长,径流含沙量呈先减小后趋于稳定的趋势,但总体上表现为各地类径流

含沙量在冲刷初始阶段最高,随后缓慢降低,最后趋于一个稳定值。随着坡度和冲刷流量的增大,径流含沙量趋于稳定的时间有所提前。这与伏耀龙等^[13]的研究结论相一致,何淑勤等^[14]也得出类似结论。因为在冲刷初期,表层松散的土壤颗粒易被水流推动下移,以至冲刷初期径流含沙量较高。随着冲刷时间的推移,可被径流推动下移的土粒减少,含沙量逐渐降低。

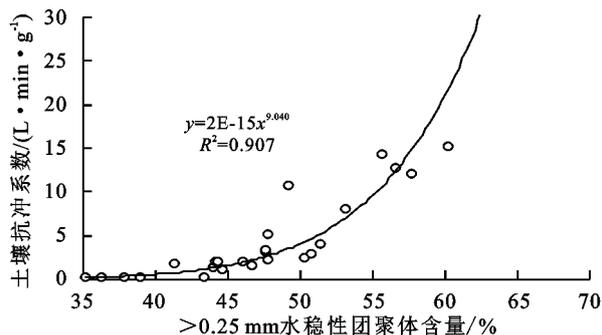


图 5 土壤抗冲系数与水稳性团聚体含量的关系

本研究表明,相同冲刷条件下不同地类土壤抗冲系数依次为 NGL(13.44~87.84 (L·min)/g) > PMP(8.14~93.15 (L·min)/g) > ASL(2.93~45.36 (L·min)/g) > AL(1.21~10.01 (L·min)/g) > OFP(1.25~5.48 (L·min)/g) > CL(0.17~1.27 (L·min)/g)。已有研究^[13,15]表明,林地和草地的土壤抗冲性远强于耕地,由于农地受人干扰频繁,可被冲刷移动的土壤颗粒较多,导致其抗冲性弱^[16];林地和草地因有植物根系的固持作用,土壤结构不易被径流破坏,表现出较强的抗冲性能^[17-18]。蒋定生等^[6]的研究结果显示,黄土高原区天然林地和天然草地土壤抗冲系数分别为 97.50~101.40, 35.35~99.45 (L·min)/g,是本研究中相同地类的 1.15~12.06 倍,农地土壤抗冲性与本研究中的 CL 相差不大。郭明明等^[2]的研究结果指出,黄土高原沟壑区农地土壤抗冲性为 0.28 (L·min)/g,不同年限的撂荒地土壤抗冲性较农地增加了 1.98~9.82 倍。本研究中,AL 的土壤抗冲性是农地的 7.88 倍。黄土高原区天然林地和草地的土壤抗冲性明显高于喀斯特区,而农地和撂荒地土壤抗冲性则与喀斯特区相差不大。本研究中 OFP 土壤抗冲系数仅高于 CL,是因为人们定期对桂花人工林进行管理,拔掉除木犀外的其他植物,一方面对土壤造成了一定程度的扰动,从而减弱其抗冲能力;另一方面,经过人为管理后的桂花人工林地几乎仅剩木犀 1 种植物,生物多样性差,以至于其土壤抗冲性较其他地类弱^[19]。

冲刷坡度和径流量也是影响土壤抗冲性能的重要因素。本研究结果得出,土壤抗冲系数随坡度和冲

刷流量的增大而降低,但总体而言,坡度对不同地类土壤抗冲性的影响更为显著。已有研究^[5,20]表明,土壤抗冲性与坡度、冲刷流量呈负相关关系,随着坡度的增加,土体稳定性变差,更容易被径流冲刷搬运。此外,冲刷径流由坡顶向坡下流动的过程中,重力势能转化为动能对土壤做功,造成土壤分散和搬运;然而,这种动能会随着坡度和冲刷流量的增加而增大,从而增强了径流剥蚀土壤的能力^[21],本研究结果也证实了这一点。

土壤物理性质是土壤本身固有的特性,土壤物理性质不同,其抗冲特性亦有差异。本结果显示,土壤抗冲性与土壤容重、砂粒含量、水稳性团聚体含量呈极显著正相关关系,与土壤总孔隙度呈极显著负相关,与黏粒含量呈显著负相关关系。印证了王健等^[22]和陈晏等^[23]的研究结论,土壤抗冲性与土壤容重、砂粒含量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关关系,与土壤总孔隙度、黏粒含量呈负相关。也有研究^[2]指出,土壤容重、砂粒含量与土壤抗冲性呈负相关,总孔隙度、黏粒含量与土壤抗冲性呈正相关关系,与本研究结论恰好相反,因为土壤容重减小和总孔隙度的增加提高了土壤的蓄水能力,缓解了径流对土壤的冲刷作用,从而增强了土壤抗冲性能。由此可见,土壤容重、机械组成及孔隙度不是影响土壤抗冲性的唯一因素,还可能与土壤水稳性团聚体等其他因素有关。

4 结论

(1)在原状土冲刷试验过程中,不同冲刷条件下各地类土壤径流含沙量在冲刷初期最大,随后呈先减小后趋于稳定状态;坡度和冲刷流量的增加会增大冲刷初始阶段的径流含沙量。

(2)各地类土壤抗冲性依次为天然草地 > 马尾松人工林地 > 天然乔灌混交林地 > 撂荒地 > 桂花人工林地 > 农地;且各地类土壤抗冲性与坡度和冲刷流量呈负相关关系。

(3)土壤物理性质是影响喀斯特区土壤抗冲性的重要因素,以土壤容重、砂粒含量、水稳性团聚体含量和土壤总孔隙度的影响最为显著。

综上,喀斯特高原山地土壤抗冲性除受土壤本身性质影响外,还与坡度、冲刷流量、植被覆盖等因素有关。因此,在今后的研究中应着重考虑各因素对土壤抗冲性的综合作用,为喀斯特高原山地土壤侵蚀防治提供更加可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] 朱显谟.黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J].水土保持通报,1982,2(1):25-30.

- [2] 郭明明,王文龙,康宏亮,等.黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):138-146.
- [3] 王雅琼,张建军,李梁,等.祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J].生态学报,2018,38(1):122-131.
- [4] 张建军,张宝颖,毕华兴,等.黄土区不同植被条件下的土壤抗冲性[J].北京林业大学学报,2004,26(6):25-29.
- [5] 任艳,薛姣姣,王健,等.黄土区5种土壤抗冲性试验分析[J].灌溉排水学报,2017,36(4):42-46.
- [6] 蒋定生,范兴科,李新华,等.黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J].水土保持学报,1995,9(2):1-8.
- [7] 周正朝,上官周平.子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J].生态学报,2006,26(10):3270-3275.
- [8] 王丹丹,张建军,丁杨,等.晋西黄土区退耕林地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2014,28(3):14-18.
- [9] Zhou Z C, Shangguan Z P. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the northern Loess Plateau [J].Catena,2010,82:87-91.
- [10] 何霄嘉,王磊,柯兵,等.中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J].生态学报,2019,39(18):6577-6585.
- [11] 刘志,杨瑞,裴仪岱.喀斯特高原峡谷区顶坛花椒与金银花林地土壤抗侵蚀特征[J].土壤学报,2019,56(2):466-474.
- [12] 任乐,张科利,郭继成.基于冲刷试验的贵州耕地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2013,27(1):56-59.
- [13] 伏耀龙,张兴昌.岷江干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性试验[J].农业机械学报,2012,43(7):50-55.
- [14] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被条件下土壤抗冲性及其影响因素[J].水土保持通报,2013,33(6):75-79,83.
- [15] 吕刚,马君蕙,王磊,等.辽西低山丘陵区不同密度荆条实地放水冲刷试验研究[J].灌溉排水学报,2019,38(增刊1):94-97.
- [16] 屈东旭,吕刚,翟景轩,等.科尔沁沙地南缘不同林草措施根系对土壤抗冲性的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):21-25.
- [17] Li Q, Liu G B, Zhang Z, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil [J].Catena,2017,153:61-65.
- [18] Wang Z H, Fang H, Chen M. Effects of root exudates of woody species on the soil anti-erodibility in the rhizosphere in a karst region[J]. Peer J,2017,5(1):e3029.
- [19] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J].土壤学报,2014,51(4):806-815.
- [20] 熊东红,杨丹,翟娟,等.元谋干热河谷冲沟沟头径流水动力学特性及产沙效应初探[J].水土保持学报,2012,26(6):52-56.
- [21] 魏霞,李勋贵,李占斌.黄土凸型复合坡面径流能量变化特征试验研究[J].水土保持学报,2014,28(6):71-76.
- [22] 王健,刘旦旦,张鹏辉.土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(1):65-68.
- [23] 陈晏,史东梅,文卓立,等.紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗冲性特征研究[J].水土保持学报,2007,21(2):24-27,35.

(上接第22页)

- [14] 周晓雯,安艳玲,吴起鑫,等.山区河流氮磷空间分布对人类活动的响应:以赤水河一级支流桐梓河为例[J].水土保持研究,2021,28(4):179-185.
- [15] 李廷华.三江并流区水资源特性分析[J].云南水力发电,2003(2):15-18.
- [16] 董立俊.雅砻江流域径流对未来气候变化的时空响应研究[D].湖北宜昌:三峡大学,2020.
- [17] 海笑,覃建雄.安宁河流域阳光资源冬季避寒农旅开发价值对比性评价[J].环境影响评价,2021,43(1):63-68.
- [18] 四川省地方志编纂委员会编纂.四川省志·地理志.下册[M].成都:成都地图出版社,1996:11-18.
- [19] 中华人民共和国水利电力部.GB/T 50159—2015 河流悬移质泥沙测验规范[S].北京:中国计划出版社,1992:12-16.
- [20] 温文杰,张建军,李依璇,等.径流含沙量测定方法研究[J].北京林业大学学报,2019,41(11):155-162.
- [21] 大连市环境监测中心. HJ 636—2012 水质:总氮的测定[S].北京:中国标准出版社,2012:1-3.
- [22] 北京市环保监测中心,上海市环境监测中心.GB/T 11893—1989 水质:总磷的测定[S].北京:中国标准出版社,1989:1-4.
- [23] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [24] 韩谓,潘保柱,陈越,等.黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布[J].环境科学,2021,4(4):1-14.
- [25] 杨盼,卢路,向晨光,等.长江干流氮、磷浓度变化趋势分析[J].环境工程,2019,37(2):178-181,186.
- [26] 何灼伦.青海湖流域河流泥沙变化及影响分析[J].人民黄河,2020,42(10):23-28.
- [27] 黎铮.紊动条件下泥沙纵向分布及氮吸附释放特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
- [28] 张丽萍,付兴涛,吴希媛.竹林坡地径流中泥沙及氮磷载荷特征模拟[J].应用生态学报,2012,23(4):881-888.